

OTIMIZAÇÃO DA ROTA NA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Ever Santoro (UNESP)

eversantoro@gmail.com

Edilaine Martins Soler (UNESP)

edilaine@fc.unesp.br

Adriana Cristina Cherri (UNESP)

adriana@fc.unesp.br



Destacando-se no agronegócio brasileiro, a cultura de cana-de-açúcar responde por 16% da matriz energética do país, sendo uma das mais limpas e renováveis do mundo. A planta é aproveitada na produção de açúcar, etanol, etanol de segunda geração, bioetanol, fertilizante e bioeletricidade. Com o aumento constante da produção e a mudança de paradigma da colheita a partir da mecanização, evidencia-se a necessidade de um estudo específico na otimização do processo de colheita. O processo de colheita está diretamente ligado ao custo total da produção da cana-de-açúcar, já que a colheita é uma das principais operações agrícolas, onde deve atender a demanda de matéria prima da usina com qualidade e a um custo competitivo. Diante desta necessidade, este artigo propõe um modelo matemático para otimização da rota na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, buscando através da análise do mapa de plantio e considerando as variáveis e restrições existentes no processo, traçar o melhor plano de colheita a ser executado pela colhedora. O modelo proposto é baseado no problema do carteiro rural, que é bastante estudado na literatura. Implementações foram desenvolvidas e testes numéricos foram realizados com dados

fornecidos por uma empresa do setor sucroenergético da cidade de Catanduva, São Paulo. Os resultados obtidos foram comparados com as rotas tradicionais de colheita da empresa e confirmaram a eficiência do modelo em fornecer soluções que minimizam o tempo de manobra da colhedora, gerando ganhos econômicos e ambientais.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Mecanização, Otimização, Modelo Matemático, Rota da Colhedora

1. Introdução

A cana-de-açúcar se destaca como uma das mais importantes culturas do agronegócio brasileiro, o Brasil é o maior produtor mundial e exportador de açúcar e de álcool de cana-de-açúcar do planeta, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor nacional (SILVA, 2008).

O setor sucroenergético do Brasil se diferencia dos outros países por produzir em escala industrial açúcar, etanol e energia elétrica, sendo a cana-de-açúcar aproveitada na produção de açúcar, etanol, etanol de segunda geração (conhecido como bioetanol), fertilizante e bioeletricidade, reduzindo impactos ambientais e gerando créditos de carbono. Portanto, há uma característica de aproveitamento múltiplo da planta, cujos produtos intermediários e finais são dotados dessa cadeia produtiva. O grau de integração entre agricultura e indústria, o volume de produção e de exportação, e o poder político e econômico dos agentes envolvidos, dão peculiar característica a este setor.

De acordo com a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), empresa pública vinculada ao MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), a área plantada de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira safra 2015/2016 resultou em uma produção de 665,6 milhões de toneladas. Na safra 2016/2017 estima-se que esta produção seja de 694,5 milhões de toneladas. Devido a grande representatividade destes números no setor mundial, assim como aumento da área plantada é possível dimensionar a importância do setor sucroenergético na economia do país (CONAB, 2016).

O setor sucroenergético tem sofrido mudanças importantes, principalmente nos métodos de colheita. Em 2007 foi promulgada a Lei 11.241/2002 (ESTADO DE SÃO PAULO, 2007), que limita a queima da cana e portanto favorece a mecanização da colheita. A previsão inicial era de que a proibição da queima da cana fosse efetiva em 2031, posteriormente, um acordo entre governo do Estado e União da Indústria de Cana-de-açúcar (Unica), estabeleceu redução do prazo para 2017. No processo de colheita mecanizada, todo o processo de corte e transporte da cana é feito por máquinas. O avanço da mecanização na colheita da cana-de-açúcar proporcionou o uso de novas tecnologias e ganho em produtividade para a cultura (SILVA, 2008).

A colheita mecanizada traz benefícios ambientais e de saúde pública, já que é extinta a queima de resíduos, e benefícios econômicos por diminuir o custo de produção. Além disso possibilita o aproveitamento da palha da cana, queimada na colheita manual, que pode ser aproveitada tanto para geração de energia nas usinas, como para a produção de etanol de segunda geração (FURTADO, 2002).

Neste novo panorama o sucesso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar depende de diversos fatores como: nivelamento do solo, formato e comprimento dos talhões, produtividade, características das variedades de cana plantada, qualidade da operação, treinamento do pessoal, entre outros. Além destes pontos, o sucesso da colheita mecanizada da cana-de-açúcar é diretamente ligado a um plantio de qualidade, sem falhas nas linhas de cana, otimizando o rendimento da máquina e paralelismo entre sulcos, proporcionando menores perdas quantitativas no processo. Considerações se fazem necessárias, visto que as atitudes tomadas na operação de plantio, serão determinantes na produtividade e na longevidade do canavial (RIPOLI & CASAGRANDE, 2006).

Neste contexto, para obtenção de maior eficiência durante o processo de colheita mecanizada, se faz necessário o planejamento da rota a ser percorrida pela máquina colhedora, a fim de reduzir o tempo gasto com manobras e, conseqüentemente, os gastos com combustível. Para colaborar nesse processo, esse trabalho apresenta um modelo matemático de otimização e metodologia de resolução para o Problema do Planejamento da Rota da Colhedora (PPRC), objetivando minimizar o tempo de manobra da colhedora, reduzindo custos e, conseqüentemente atendendo os principais requerimentos competitivos do setor sucroalcooleiro e assim responder aos desafios estratégicos de redução de custos e melhoria da produtividade.

Este trabalho está organizado como segue: na Seção 2 é descrito o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, na Seção 3 é apresentado o modelo matemático de otimização para o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora, na Seção 4 estão os resultados numéricos obtidos para uma fazenda, e finalmente na Seção 5 estão as considerações finais.

2. Conhecendo o processo

Juntamente com a inserção da colheita mecanizada no contexto sucroenergético, novas tecnologias e aprimoramentos em todo o processo de plantio e colheita foram realizados. O controle de qualidade focado no plantio devido ao preparo do solo, buscando uma maior rentabilidade na colheita mecanizada, se tornou prioridade, assim como a criação de técnicas para que a colheita mecanizada seja realizada de forma mais econômica possível e com maior rentabilidade. Além destes pontos fundamentais para um melhor aproveitamento da área, existe também a necessidade do planejamento, como o formato dos talhões e o traçado dos carregadores, sempre considerando o relevo e o solo.

Anterior a mecanização, o sistema tradicional de plantio da cana-de-açúcar, apesar de ser eficiente no controle de erosões baseia-se em um formato antigo, ao qual prejudica todas as operações mecanizadas, devido à construção de terraços (ou curvas de nível). Como não existe paralelismo entre os terraços e estes são guias da sulcação, as linhas de cana tornam-se descontínuas, necessitando de manobras em máquinas e equipamentos originando desta forma as ruas mortas que prejudicam o sistema operacional. O objetivo principal de uma maior análise no plantio é diminuir o terraceamento e racionalizar a sulcação da área, diminuindo ao máximo o número de manobras dos equipamentos, sem perder a segurança no controle de erosão. A mecanização trouxe a adoção das práticas de preparo conservacionista (preparo reduzido) onde é possível melhorar o planejamento da sulcação, aumentando a capacidade operacional da mecanização agrícola pela redução de "sulcos mortos". Praticamente todas as operações no canavial seguem as linhas de plantio da cultura. Quanto mais linhas (sulcos) houver, mais manobras serão necessárias e, com isso, maior será o tempo para realizar as operações. Para colheita mecânica estima-se um gasto de 1,5 a 2,0 minutos por manobra da colhedora e do veículo de transbordo ou caminhão. Fazer uma análise das linhas de canas que serão colhidas, sulcando direto entre os talhões e atravessando o plantio entre os diversos carregadores (processo conhecido como tiro longo ou tiro direto), facilitará a colheita em todo o comprimento da área, garantindo ganho de tempo e lucro ao setor (BENEDINI & CONDE, 2008).

3. O problema de planejamento da rota da colhedora

O planejamento da sulcação se faz necessário, porém, o setor sucroalcooleiro busca constante melhoria no processo de colheita e, uma forma viável de otimização está no planejamento da rota da colhedora na colheita mecanizada.

No processo de colheita encontram-se diversas máquinas trabalhando praticamente ininterruptamente durante toda a safra, que normalmente compreende de abril a novembro. Nota-se assim, que um planejamento que otimize alguns segundos de trabalho de uma máquina por hectare (região com uma área 10.000 m²), terá o impacto de horas de trabalho em uma safra e, conseqüentemente, de toneladas de cana. Para que isto realmente ocorra, é necessário um mapeamento das linhas de cana existentes nos talhões, assim como a informação de que linhas de cana poderiam ser ligadas quanto a topografia, mesmo estando separadas por um carreador. Apesar de possuir um carreador, se a colhedora ao invés de manobrar para trocar de linha de cana, prosseguir na colheita atravessando o carreador consegue-se obter uma linha de cana de maior comprimento. Observa-se que a travessia de uma colhedora sobre o carreador leva em média 10 segundos enquanto uma manobra para mudança de linha de cana levaria entre 1,5 a 2 minutos. Com esta técnica, também conhecida como "tiro direto" ou "tiro longo", tem-se um impacto direto na produtividade e economia da empresa sucroalcooleira (BENEDINI & CONDE, 2008).

A partir do panorama da mecanização tem-se o Problema de Planejamento da Rota da Colhedora (PPRC), que consiste em decidir qual a melhor rota a ser realizada pela colhedora, visto que é conhecido o layout do canavial. O modelo matemático proposto para descrever este problema, visa minimizar o tempo de manobra da colhedora, de modo que esta deve obrigatoriamente passar por todas as linhas de cana. Considera-se como tempo de manobra, o tempo em que a colhedora está em funcionamento mas não está colhendo.

Para modelar matematicamente este problema consideraremos um grafo não orientado em que cada linha de cana corresponde a uma aresta limitada por dois vértices do grafo (cada vértice é um nó do grafo, sendo representado pelo início e fim da linha de cana). As arestas do grafo

possuem custos associados que representam o tempo de manobra da máquina colhedora. Sabe-se que o tempo de manobra da máquina para trocar de linha de cana é muito alto.

Assim, este problema reduz-se ao Problema do Carteiro Rural (Eiselt *et al.*, 1995), em que dado um grafo $G = (V, A)$, em que V corresponde ao conjunto de vértices, com $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, e A representa o conjunto de arestas entre os vértices, $A = \{(i, j), i \neq j\}$. Definimos um subconjunto $A_r \subset A$, de arestas obrigatórias. O problema consiste em determinar um caminho fechado de custo mínimo, partindo de um ponto de origem e passando por cada aresta de A_r uma vez. As arestas obrigatórias A_r , correspondem as linhas de cana e, posteriormente a colhedora retorna ao ponto de origem.

Os parâmetros utilizados na modelagem matemática foram:

A : conjunto de arestas do grafo;

A_r : conjunto de arestas obrigatórias (correspondem as linhas de cana);

t_{ij} : tempo de manobra da colhedora associado a aresta $(i, j) \in A$.

As variáveis de decisão são:

$$x_{ij} : \begin{cases} 1, & \text{se aresta } (i, j) \text{ é percorrida pela colhedora} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Assim, tem-se o modelo matemático para o PPRC:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} x_{ij} + t_{ji} x_{ji} \quad (1)$$

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} x_{ji} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1, \quad \text{para todo } (i, j) \in A_r, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \text{para } S \subset \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \text{ e } S \neq \emptyset \quad (4)$$

$$\sum_{(o,j) \in A} x_{oj} \geq 1, \quad (5)$$

$$\sum_{(i,o) \in A} x_{io} \geq 1, \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \text{para todo } (i, j) \in A. \quad (7)$$

No modelo matemático (1)-(7), a função objetivo (1) minimiza o tempo de manobra da colhedora. As restrições (2) garantem a continuidade do percurso; as restrições (3) garantem que toda linha de cana (aresta obrigatória) seja percorrida uma vez pela colhedora; as restrições (4) proíbem a construção de sub-rotas ilegais, ou seja, pequenos roteiros desconexos do roteiro principal; as restrições (5) e (6) garantem que a colhedora inicie o percurso um ponto de origem e retorne para este mesmo local no final do percurso, nestas restrições “o” representa o nó de origem; e as restrições (7) indicam que as variáveis x_{ij} são binárias.

Embora o modelo (1)-(7) seja classificado como NP-difícil, devido às características do grafo associado ao problema, foi possível utilizar um software comercial para sua resolução em um período de tempo aceitável. Na próxima seção serão apresentados os testes numéricos com dados fornecidos por uma indústria sucroenergética sediada na região de Catanduva interior do estado de São Paulo.

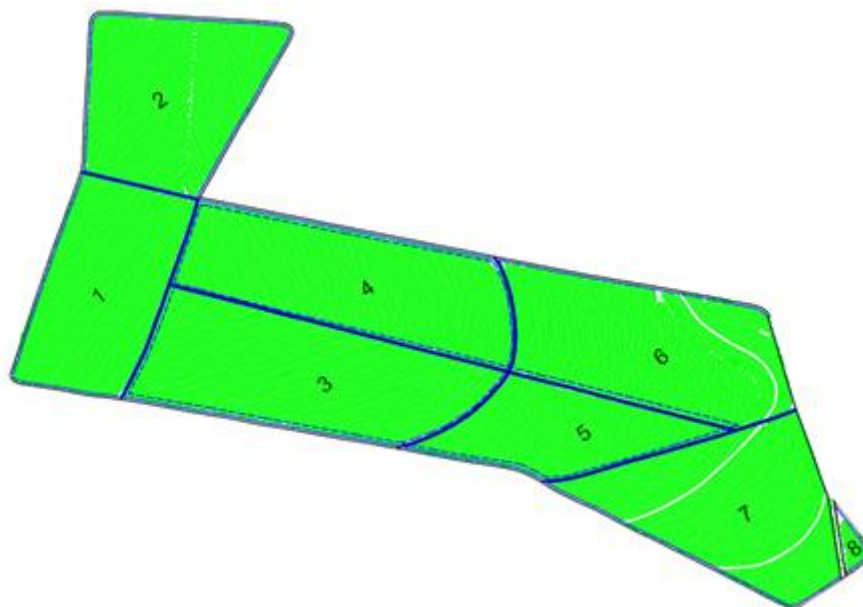
4. Resultados numéricos

Como a abordagem é relevante para a literatura no contexto sucroenergético, serão detalhados os *softwares* utilizados e a forma de implementação para resolução do modelo (1)-(7). Por tratar-se de um problema NP-difícil, desenvolveu-se a implementação computacional para que o mesmo fosse resolvido por um *software* comercial de alto desempenho. Para tanto, os testes foram executados no *solver* CPLEX 12.3 versão de 64 bits, utilizando como interface o *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, acessado via linguagem de programação Java. Os dados utilizados foram armazenados no sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) *Oracle Database 11g Express Edition Release 2*, que se trata de uma versão gratuita do sistema gerenciador de banco de dados *Oracle*. Todos os testes foram realizados em um computador com processador i7 2a geração, com 16Gb de memória RAM e HD de 120Gb SSD.

Para validação e resolução do modelo proposto (1)-(7), foram realizados testes computacionais com os dados fornecidos por um grupo sucroenergético, formado por quatro unidades produtoras, o qual possui sua matriz na região de Catanduva, interior do Estado de São Paulo. Para realização dos testes foi utilizada a linguagem de programação Java, integrada ao *solver* CPLEX. Os dados utilizados nos testes são descritos a seguir.

A fazenda selecionada para realização dos testes é dividida em 08 talhões, totalizando 75,86ha (hectares). Buscando agilizar a colheita da cana, foram distribuídos na fazenda 4 pontos de bate (locais de transferência de cana), agrupando assim as áreas a serem colhidas. A Figura 1 ilustra o mapa da fazenda utilizada nos testes. A Tabela 1 apresenta o bate correspondente a cada talhão (Bate), a área em hectares (Área), a área referente as linhas de cana mais o carreador (Cana + Carreador) e a estimativa de produção em toneladas de cada talhão.

Figura 1: Fazenda utilizada nos testes



Fonte: Próprio autor

Tabela 1: Dados da fazenda

*(tch) Tonelada de cana por hectare

| Talhão | Bate | Área (ha) | Cana + Carreador | Estimativa (tch*) |
|--------|------|-----------|------------------|-------------------|
| 0001 | 1 | 9,17 | 9,65 | 81,48 |
| 0002 | 1 | 9,92 | 10,51 | 81,48 |
| 0003 | 2 | 12,65 | 13,21 | 81,48 |
| 0004 | 2 | 11,84 | 12,40 | 81,48 |
| 0005 | 3 | 6,17 | 6,58 | 81,48 |
| 0006 | 3 | 11,50 | 11,97 | 81,48 |
| 0007 | 4 | 10,65 | 11,10 | 81,48 |
| 0008 | 4 | 0,35 | 0,44 | 81,48 |

Fonte: Próprio autor

Devido a topologia de cada fazenda, o processo de colheita é realizado por frentes de colheita. Esta fazenda é dividida em 4 frentes de colheita, sendo a frente 01 responsável pelos talhões 1

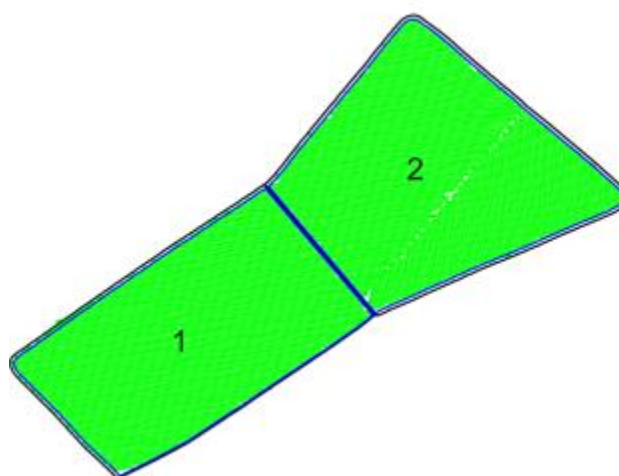
e 2, a frente 02 responsável pelos talhões 3 e 4, a frente 03 responsável pelos talhões 5, e 6 e por fim a frente 04 responsável pelos talhões 7 e 8. As instâncias 01 à 04 representam cada uma destas frentes de colheita.

Em todos os testes realizados, foram considerados os tempos de manobra da colhedora, de 120 segundos (2 minutos) para mudança de linha de cana, de 10 segundos para travessia da colhedora sobre o carreador (tiro direto), e o tempo de deslocamento do bate até o ponto inicial e do ponto final até o bate, de 20 segundos.

4.1 Instância 01

A Instância 01 é formada pelos talhões 1 e 2 (Figura 2), que juntos somam 20,16ha e 308 linhas de cana. Na solução fornecida utilizando o modelo matemático (1)-(7) para este caso, o tempo total de manobra da colhedora foi de 12625 segundos.

Figura 2: Instância 01 – Talhões 1 e 2

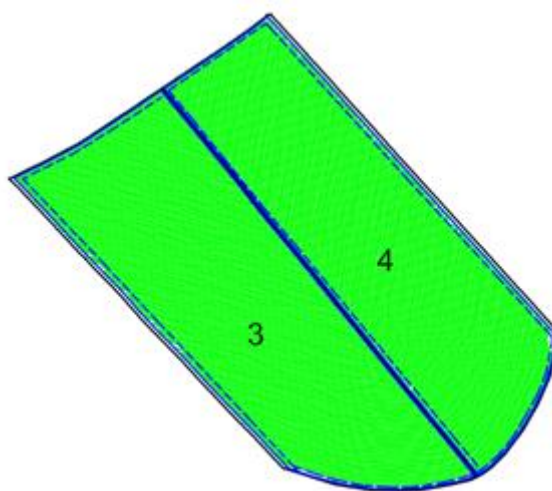


Fonte: Próprio autor

4.2 Instância 02

A Instância 02 é formada pelos talhões 3 e 4 (Figura 3), que juntos somam 25,61ha e 212 linhas de cana. Na solução fornecida utilizando o modelo matemático (1)-(7) para este caso, o tempo total de manobra da colhedora foi de 10602 segundos.

Figura 3: Instância 02 – Talhões 3 e 4

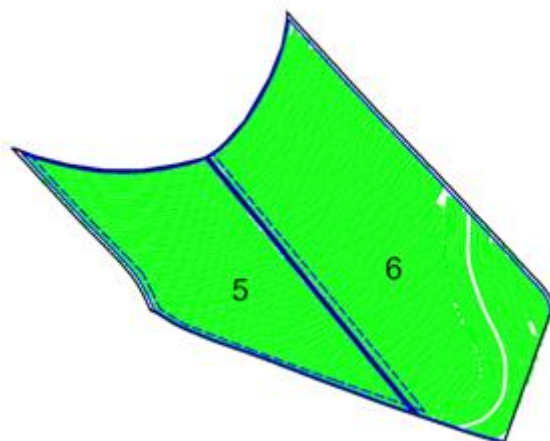


Fonte: Próprio autor

4.3 Instância 03

A Instância 03 é formada pelos talhões 5 e 6 (Figura 4), que juntos somam 18,55ha e 218 linhas de cana. Na solução fornecida utilizando o modelo matemático (1)-(7) para este caso, o tempo total de manobra da colhedora foi de 10435 segundos.

Figura 4: Instância 03 – Talhões 5 e 6

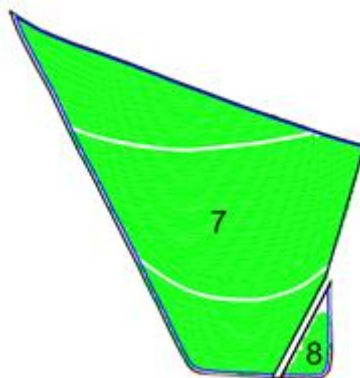


Fonte: Próprio autor

4.4 Instância 04

A Instância 04 é formada pelos talhões 7 e 8 (Figura 5), que juntos somam 11,54ha e 158 linhas de cana. Na solução fornecida utilizando o modelo matemático (1)-(7) para este caso, o tempo total de manobra da colhedora foi de 7227 segundos.

Figura 5: Instância 04 – Talhões 7 e 8



Fonte: Próprio autor

A Tabela 2, apresenta o tempo de manobra da colhedora pelo método tradicional, o tempo de manobra da colhedora utilizando o modelo matemático (1)-(7), e o tempo de processamento. O tempo de manobra Trad./s refere-se ao tempo total de manobra da colhedora no processo adotado pela indústria sem otimização. O tempo de manobra Otim./s refere-se ao tempo de manobra na solução obtida pelo modelo matemático. O tempo de processamento, refere-se ao tempo usado pelo sistema desde o início do processo computacional, sendo este, a consulta ao banco de dados, montagem do modelo matemático, resolução pelo CPLEX e apresentação dos resultados.

Tabela 2: Comparação dos resultados

| Frente de Colheita | Tempo de Manobra | | Tempo de Processamento |
|---------------------|------------------|---------|------------------------|
| | Trad./s | Otim./s | |
| Instância 01 | 19830 | 12625 | 4,267 |
| Instância 02 | 13655 | 10602 | 5,128 |
| Instância 03 | 16320 | 10435 | 4,895 |
| Instância 04 | 9950 | 7227 | 3,957 |

Fonte: Próprio autor

Desta forma, pode-se verificar que em um sistema tradicional de colheita, para esta fazenda seriam necessárias 16 horas, 35 minutos e 55 segundos de tempo de manobra da colhedora. Já na solução fornecida utilizando modelo matemático (1)-(7) para este caso o tempo total de manobra da colhedora foi de apenas 11 horas, 21 minutos e 29 segundos. Ou seja, para uma pequena área analisada, o ganho foi de 5 horas, 14 minutos e 26 segundos, isto é, 31,57% do tempo de manobra da colhedora. Além dos ganhos com o tempo da colheita, podemos destacar a economia com o combustível utilizado pela máquina, assim como os benefícios ambientais.

5. Considerações finais

Este trabalho envolve um problema real de planejamento da rota da máquina colhedora utilizada no processo de colheita da cana-de-açúcar objetivando reduzir o tempo de manobra da máquina. Foi proposto um modelo matemático de otimização e metodologia de resolução para o

planejamento do percurso a ser realizado pela colhedora em um processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

Visto a importância do setor sucroenergético para a economia nacional e o constante esforço empregado pelo mesmo na busca de otimização do processo da colheita mecanizada, este trabalho apresenta uma metodologia para resolução de um problema prático, que envolve um dos principais processos de um setor fundamental na economia nacional. Destaca-se a importância da integração do meio acadêmico com as empresas e os benefícios que ambos podem obter através das pesquisas, trazendo soluções que viabilizam ainda mais grandes setores econômicos no país.

Na metodologia proposta tem-se a diminuição do tempo da colheita, devido a diminuição do número de manobras para troca de linhas, a redução do consumo e também do tempo improdutivo da colhedora, que reduz desta forma o custo operacional em relação a todo o processo de colheita mecanizada. Além disso tem-se a economia direta com toda mão de obra da frente de colheita, o aumento da quantidade de cana-de-açúcar enviada a indústria e também os benefícios para o meio ambiente e a saúde pública, devido a menor emissão de CO₂.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPQ (Processo nº 477481/2013-2).

REFERÊNCIAS

- BENEDINI, S. M.; CONDE, J.A. (2008) Sistematização da área para colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Revista Coplana, 23, 23-25.
- CONAB (2016) – Companhia Nacional de Abastecimento – Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar – Safra 2016/17 – Terceiro Levantamento, Brasília, 3, 1-27.
- EISELT, H. A., GENDREAU, M., & LAPORTE, G. (1995). Arc routing problems, part II: The rural postman problem. Operations Research, 43(3), 399-414.
- FURTADO, F. (2002) Mecanização da colheita da cana traz benefício ambiental, <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/agricultura-e-agronomia/mecanizacao-da-colheita-da-cana-traz-beneficio> , 2, 2015.
- RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V. (2006) Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte, Livrocere, 80-91, 2006.
- SÃO PAULO (Estado) (2007). Resolução SMA n. 33, de 21 de junho de 2007. Disposição sobre aplicação da Lei nº 11.241/2002, com respeito à limitação gradativa da queima de palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.